

УДК 621.315

Синтез нанодисперсных порошков оксидов церия, иттрия и гадолиния

© 2024 г. А. А. Островская¹✉, О. И. Андреева¹, К. А. Аксенова¹,
Е. Л. Чувиллина¹, А. А. Гасанов¹, Е. В. Силина²

¹ ООО «ЛАНХИТ», ш. Энтузиастов, д. 34, Москва, 105118, Российская Федерация

² Первый Московский государственный медицинский университет
имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации,
ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2, Москва, 119048, Российская Федерация

✉ Автор для переписки: ostrovskaya.a.a@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрена технология получения нанодисперсных порошков оксидов церия, иттрия и гадолиния. Процесс основан на осаждении из нитратов редкоземельных металлов (РЗМ) карбонатов и их термическом разложении. Установлено, что размеры частиц нанодисперсных порошков оксидов РЗМ зависят от концентрации исходного нитратного раствора редкоземельного металла, скорости проведения процесса осаждения карбоната, а также параметров его термического разложения — температуры и времени. Быстрая и равномерная подача осадителя в данной работе была реализована путем впрыскивания раствора $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ в постоянно перемешиваемую реакционную массу. Для каждого из оксидов была подобрана оптимальная температура термообработки. Получены килограммовые партии наноразмерных порошков оксидов церия, иттрия и гадолиния с размерами частиц в диапазоне от 15 до 30 нм, однофазность которых подтверждена данными рентгенофазового анализа, а размеры частиц установлены при помощи просвечивающей электронной микроскопии.

Ключевые слова: наночастицы, оксид гадолиния, диоксид церия, оксид иттрия

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–65–10040, <https://rscf.ru/project/23-65-10040/>

Для цитирования: Островская А.А., Андреева О.И., Аксенова К.А., Чувиллина Е.Л., Гасанов А.А., Силина Е.В. Синтез нанодисперсных порошков оксидов церия, иттрия и гадолиния. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2024; 27(3): 245—253. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202405.601>

Synthesis of nanodisperse powders oxides of cerium, yttrium and gadolinium

A. A. Ostrovskaya¹✉, O. I. Andreeva¹, K. A. Aksenova¹,
E. L. Chuvilina¹, A. A. Gasanov¹, E. V. Silina²

¹ LANHIT LLC, 34 Entuziastov Highway, Moscow 105118, Russian Federation

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University
of the Ministry of Health of the Russian Federation,
8–2 Trubetskaya Str., Moscow 119048, Russian Federation

✉ Автор для переписки: ostrovskaya.a.a@yandex.ru

Abstract. The article discusses the technology of obtaining nanodisperse powders of cerium, yttrium and gadolinium oxides. The process is based on the precipitation of carbonates from (REM) nitrates and their thermal decomposition. It was found that the particle sizes of nanodispersed REM oxide powders depend on the concentration of the initial nitrate solution of the rare earth metal, the speed of the carbonate deposition process, as well as the parameters of its thermal decomposition – temperature and time. The rapid and uniform supply of the precipitator in this work was realized by injecting a solution of $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ into a constantly stirring reaction mass. The optimal heat treatment temperature was selected for each of the oxides. As a result of the work, kilogram batches of nanoscale powders of cerium, yttrium and gadolinium oxides with particle sizes in the range from 15 to 30 nm were obtained, the single-phase nature of which was confirmed by X-ray phase analysis data, and the particle sizes were determined using transmission electron microscopy.

Keywords: nanoparticles, gadolinium oxide, cerium dioxide, yttrium oxide

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23–65–10040, <https://rscf.ru/project/23-65-10040/>

For citation: Ostrovskaya A.A., Andreeva O.I., Aksenova K.A., Chuvilina E.L., Gasanov A.A., Silina E.V. Synthesis of nanodisperse powders oxides of cerium, yttrium and gadolinium. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki* = *Materials of Electronics Engineering*. 2024; 27(3): 245–253. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202405.601>

Введение

Наноматериалы вызывают интерес ученых на протяжении последних двух десятилетий и спрос на наноразмерные материалы растет с каждым годом. Это связано с тем, что наноразмерные материалы проявляют совершенно отличные свойства от материалов традиционных размеров (1 мкм = 10^{-3} нм): использование наноскопических систем дает возможность получения материалов с уникальными свойствами и создание на их основе новых приборов. Особое внимание уделяется оксидам и сложным оксидным соединениям редкоземельных металлов (**РЗМ**). Некоторые из них, такие как молибдаты, бораты, гранаты и перовскиты обладают эффективными скинтилляционными свойствами и находят применение в различных областях науки и техники. Наноразмерные оксиды РЗМ Ln_2O_3 ($\text{Ln} = \text{Eu}, \text{Gd}, \text{La}, \text{Lu}, \text{Y}$ и CeO_2) успешно применяются при изготовлении оптической кера-

мики и сверхпрочных сплавов. Керамика на основе наноразмерных оксидов гадолиния и иттрия демонстрирует новые оптические свойства [1]. Также нанодисперсные оксиды РЗМ находят применение в процессах катализа, повышают механические свойства нержавеющей сталей. Соединения тулия и гольмия могут быть использованы в качестве легирующих добавок при синтезе различных наночастиц. Металлы и оксиды, легированные тулием или гольмием, проявляют высокоэффективные электрические и оптические свойства в большом диапазоне применений, включая лазеры, дисплеи, системы биовизуализации. Кроме того, добавление тулия или гольмия может положительно влиять на механические свойства материала и его термическую стабильность, что имеет значительную роль для многих областей применения, включая электронику и энергетику [2–5].

Особую роль в разных сферах играют наночастицы диоксида церия. Их используют в ка-

честве катализаторов в различных химических реакциях, таких как окисление, восстановление, преобразование углеводородов и другие процессы. Высокая поверхностная активность и способность к абсорбции кислорода позволяет применять нанодисперсный диоксид церия при изготовлении эффективных катализаторов. Материалы на основе наноразмерного CeO_2 используются в электрохимических устройствах, таких как твердотельные оксидные топливные элементы, электролиты для литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторы благодаря их высокой проводимости и химической стабильности. Наночастицы CeO_2 могут быть использованы в защитных покрытиях, обеспечивая защиту от коррозии, абразии и ультрафиолетового излучения. CeO_2 в нанодисперсных размерах может быть использован в солнечных элементах для улучшения эффективности преобразования солнечной энергии благодаря своей способности улавливать свет и уменьшать рекомбинацию носителей заряда. Также он находит применение в экологических технологиях, таких как очистка воздуха и воды, благодаря своей способности адсорбировать вредные вещества. Кроме того, наноразмерные кислородсодержащие соединения церия, такие как CeO_2 , CePO_4 , являются перспективными материалами для биомедицинских исследований, поскольку существуют работы, доказывающие влияние наночастиц церия на протекание редокс-процессов в живой клетке [6—9]. Таким образом, наноразмерный CeO_2 представляет собой универсальный и многообещающий материал с широкими возможностями применения в различных областях: от электроники и катализа до медицины и экологии.

Наноразмерный оксид гадолиния может найти применение в качестве нового типа многофункционального контрастного вещества для магнитно-резонансной томографии. Так же благодаря своим магнитным свойствам нанодисперсные оксиды гадолиния и иттрия являются перспективными материалами в области многофункциональной наномедицины, в системах транспорта лекарств, магнитной гипертермии и в качестве медицинских маркеров [10—22].

Однако проявляемые свойства таких соединений могут сильно зависеть от размеров частиц, именно поэтому изучение свойств, структуры и нахождение новых методов синтеза нанодисперсных материалов актуально и вызывает большой интерес.

Наноразмерные порошки оксидов РЗМ можно получить путем термического разложения гидроксида или оксалата, однако в случае разложения оксалата частицы получаются более крупного размера, а гидроксид плохо поддается фильтрации, поэтому в качестве промежуточного соединения

для термического разложения использовались карбонаты РЗМ [2, 5, 23, 24].

В работе [23] установлено, что размер частиц получаемого оксида зависит от концентрации исходного раствора, концентрации регулятора кристаллизации, температуры прокаливания, а также в значительной степени от времени проведения процесса.

Все описываемые исследования получения наноразмерных оксидов РЗМ позволяют получать малые количества веществ — граммовые и микрограммовые. Таким образом, на данный момент существуют только препаративные методы синтеза. Нашей задачей является разработка метода синтеза нанодисперсных порошков оксидов РЗМ, позволяющего надежно получать малотоннажные объемы материалов.

Широкое производство наноматериалов вызывает ряд трудностей — низкая производительность в сочетании с высокими трудозатратами, узкий диапазон контролируемых параметров, определяющих размер частиц.

Одной из особенностей синтеза нанодисперсных материалов является одновременная подача малых количеств реагентов в реакционный сосуд. Известные методы синтеза нанопорошков оксидов РЗМ используют капельный способ подачи осадителя, что позволяет получать частицы с размером зерна более 30 нм. Целью работы является синтез нанодисперсных порошков оксидов РЗМ (на примере церия, гадолиния и иттрия), позволяющим надежно получать частицы меньших размеров, а именно 15—30 нм.

Экспериментальная часть

Для приготовления раствора нитрата гадолиния использовался оксид гадолиния Gd_2O_3 марки ГдО-Д и азотная кислота HNO_3 (Сигма Тек, «о. с. ч. 18–4»). Раствор азотнокислого гадолиния содержал органическую примесь, которая присутствовала в исходном материале — оксиде гадолиния. Присутствие органических веществ в редкоземельных оксидах — явление достаточно частое и вызвано недостаточной температурой финишной прокалики оксалатов РЗМ, а также присутствием неразложившихся остатков используемых на производстве экстрагентов и ионообменных смол. Такие органические примеси влияют на цвет и растворимость редкоземельных солей. Для их удаления нитратный раствор подвергался кипячению с активированным углем и последующей фильтрации.

В качестве исходного для осаждения раствора использовался гадолиний азотнокислый $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3$ с различной концентрацией по оксиду и кислотностью среды рН 2—3. Далее раствор азотнокислого гадолиния смешивался со свежеприготовленным

раствором нитрата аммония NH_4NO_3 с концентрацией 375 г/л и при постоянном перемешивании осаждался раствором карбоната аммония $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ марки «ч. д. а.» с концентрацией 200 г/л путем распыления последнего в раствор нитрата гадолиния.

Предварительными опытами было установлено, что скорость подачи осадителя должна быть максимально высокой и при этом обеспечить минимальный разогрев реакционной смеси, поскольку и длительная выдержка и нагрев реакционной смеси неизбежно приводят к укрупнению осадка. Скорость подачи осадителя на одну порцию должна соответствовать времени осаждения около 7–10 мин [6].

Полученный осадок фильтровался, промывался 1,5–2 литрами дистиллированной воды температурой 40–50 °С и сушился при температуре 30 °С на протяжении 2–3 дней до остаточного содержания влаги 5–6 %. Затем сухой осадок измельчался и подвергался термическому разложению в муфельной печи при температуре 750 °С в течение трех часов. Полученный порошок оксида гадолиния протирался через сетку из полиамидного волокна с размером ячейки 0,2 мм.

Для получения нанодисперсных оксидов иттрия и церия (IV) использовались аналогичные условия и методика синтеза, а именно: концентрация растворов $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ ($\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$) — 250 г/л по Y_2O_3 (CeO_2); концентрация раствора регулятора кри-

сталлизации NH_4NO_3 — 375 г/л; концентрация раствора осадителя $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ — 200 г/л; температура и объем воды для промывки — 40–50 °С и 1,5–2 л соответственно; время и температура сушки — 2–3 сут. и 30 °С; температура термообработки и время выдержки — 750 °С и 3 ч для разложения $\text{Y}_2(\text{CO}_3)_3$ и 450 °С и 3 ч для разложения $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$.

Значения параметров температуры термообработки были выбраны, исходя из свойств данных по разложению карбонатов РЗМ до соответствующих оксидов, а значение времени выдержки должно быть достаточным для того, чтобы произошло не только разложение соединения до оксида РЗМ, но и удалились ионы аммония и нитрат ионы, оставшиеся после промывки.

Определение фазового состава нанопорошков оксидов РЗМ проводили методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре Bruker D8 с использованием CuK_α -излучения. Структуру, размеры и морфологию частиц изучали методом просвечивающей электронной микроскопии с помощью микроскопа JEM 2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Результаты и их обсуждение

Нанопорошок оксида гадолиния Gd_2O_3 .
В табл. 1 приведены данные о размере частиц порошка Gd_2O_3 , полученные по результатам анализа просвечивающего электронного микроскопа, в зависимости от концентрации азотнокислого гадолиния в исходном растворе. Концентрацию исходного раствора нитрата гадолиния изменяли от 100 до 350 г/л по оксиду гадолиния.

В данной работе использовался распылительный способ подачи раствора осадителя $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ в реактор, что обеспечивает более равномерное распределение. Данный способ подачи позволяет уменьшить крупность получаемых частиц карбоната гадолиния, и как следствие индивидуальных частиц оксида гадолиния после разложения карбоната, в сравнении с капельным способом (см. табл. 1).

Как видно из данных, приведенных в табл. 1, что выбранный способ подачи осадителя позволяет получать размеры частиц в диапазоне от 15 до 40 нм. При увеличении концентрации нитрата гадолиния в исходном растворе размер частиц получаемого порошка увеличивается. При концентрации азотнокислого гадолиния 100–200 г/л карбонат гадолиния осаждается не полностью, по-видимому, из-за образования аморфного двойного карбоната аммония–гадолиния [25], что ведет к потере продукта.

На основании полученных данных была выбрана оптимальная концентрация исходного раствора 250 г/л по оксиду гадолиния для осаждения.

Таблица 1 / Table 1

Зависимость размера зерна оксида гадолиния Gd_2O_3 от концентрации нитрата гадолиния $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3$
Dependence of the grain size of gadolinium oxide Gd_2O_3 on the concentration of gadolinium nitrate $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3$

Концентрация азотнокислого гадолиния в исходном растворе, г/л	Средний размер зерна оксида гадолиния, нм	Примечание
100	—	Нет полного осаждения карбоната
150	—	Нет полного осаждения карбоната
200	15—20	Нет полного осаждения карбоната
250	25—30	
300	30—35	
350	30—40	
250	30—35	Осадитель $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ подавался капельным методом

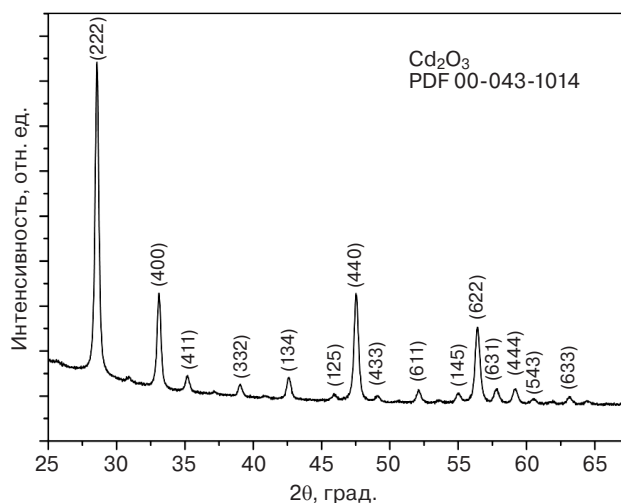


Рис. 1. Дифрактограмма порошка Gd_2O_3
Fig. 1. Diffraction pattern of Gd_2O_3 powder

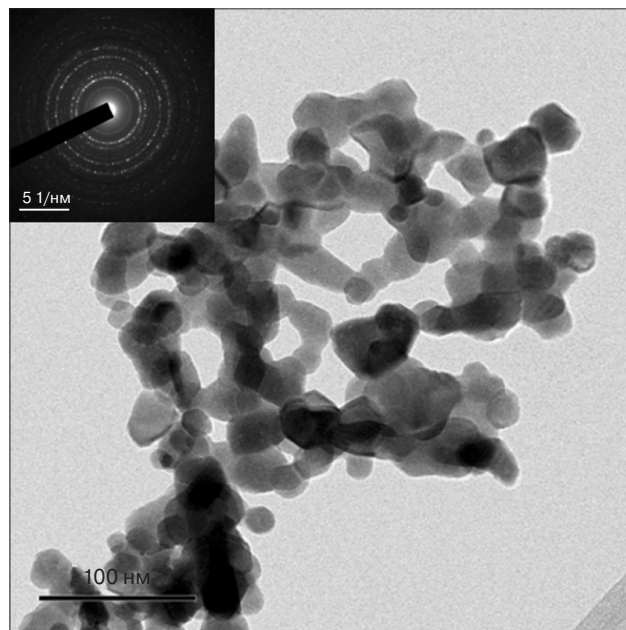


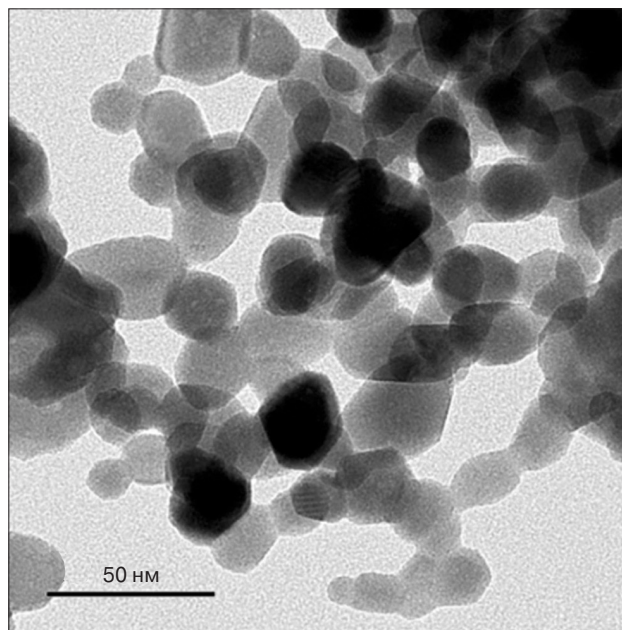
Рис. 2. ПЭМ-изображения частиц порошка Gd_2O_3
Fig. 2. TEM images of Gd_2O_3 powder particles

максимумы уширены, размер областей когерентного рассеяния составляет 20 нм.

На рис. 2 приведены изображения частиц порошка оксида гадолиния, полученного путем термализации карбоната гадолиния.

Частицы порошка оксида гадолиния представляют собой агломераты, состоящие из мелкодисперсных частиц. Дифракция с выбранной области показывает, что порошок является кристаллическим. Расположение дифракционных максимумов на кольцевой электронограмме отвечает фазе Gd_2O_3 . Форма частиц оксида гадолиния близка к сферической, на некоторых частицах видна огранка. На рис. 3 приведено распределение частиц Gd_2O_3 по размерам.

Размер частиц в порошке изменяется от 5 до 45 нм. Максимум распределения частиц по размерам соответствует ~20 нм. Это хорошо согласуется



Аналогичные результаты были получены в работе [24]: стабильная крупность наноразмерных порошков сохраняется только в пределах выбранной концентрации исходного нитрата лантаноида, при повышении концентрации нитрата РЗМ крупность полученного оксида после прокалики увеличивается, а при снижении концентрации нитрата лантаноида, падает производительность самого процесса осаждения.

На рис. 1 приведена дифрактограмма порошка Gd_2O_3 , полученного при оптимальной концентрации исходного раствора 250 г/л по оксиду гадолиния для осаждения.

Порошок оксида гадолиния однофазный, на дифрактограмме присутствуют только отражения от плоскостей, принадлежащих фазе Gd_2O_3 с периодом решетки $a = 1,0816(1)$ нм. Дифракционные

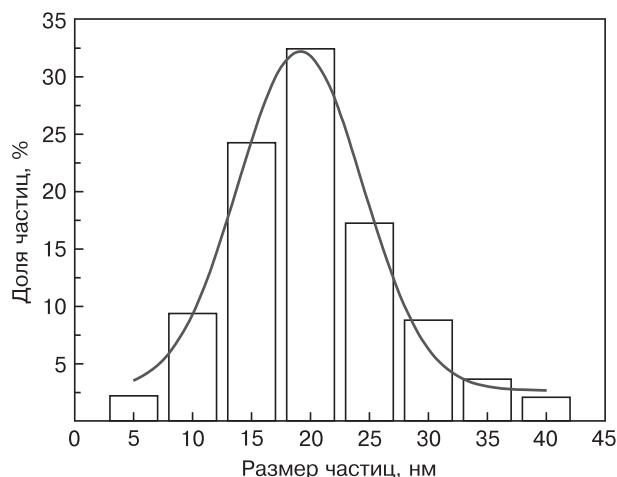


Рис. 3. Распределение частиц порошка Gd_2O_3 по размерам
Fig. 3. Distribution of Gd_2O_3 powder particles by size

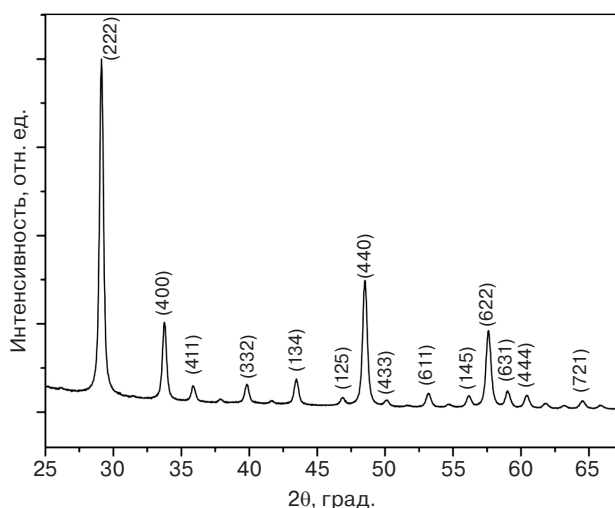


Рис. 4. Дифрактограмма порошка Y_2O_3
Fig. 4. Diffraction pattern of Y_2O_3 powder

с данными о среднем размере ОКР и может свидетельствовать о том, что частицы порошка Gd_2O_3 являются монокристаллическими.

Также изучалось влияние присутствия регулятора кристаллизации NH_4NO_3 на крупность получаемых частиц. Было проведено 2 эксперимента с наилучшими значениями всех параметров синтеза, указанных выше, но в одном случае в раствор азотнокислого гадолиния добавлялся раствор нитрата аммония, а в другой нет. В результате синтеза с регулятором кристаллизации размеры индивидуальных частиц оксида гадолиния Gd_2O_3 составили 15—20 нм, без NH_4NO_3 размеры частиц соответствовали значениям 25—30 нм. Таким образом, мы можем утверждать, что регулятор кристаллизации также оказывает влияние на крупность наночастиц.

Нанопорошок оксида иттрия Y_2O_3 . Для получения порошка Y_2O_3 использовали раствор с концентрацией 250 г/л по оксиду. Полученные порошки были однофазными (рис. 4). Средний размер ОКР ~20 нм.

По данным ПЭМ частицы порошка мелко-дисперсные, образуют достаточно плотные агломераты (рис. 5). В агломерате частицы хаотично разориентированы, о чем свидетельствует вид электронограммы. На рис. 6 приведено распределение частиц Y_2O_3 по размерам. Размер частиц изменяется от 10 до 45 нм, максимум распределения соответствует ~20 нм.

Нанопорошок диоксида церия CeO_2 . Порошок CeO_2 , полученный с использованием раствора с концентрацией 250 г/л по оксиду, также как и порошки Gd_2O_3 и Y_2O_3 , был однофазным. На рис. 7 приведена дифрактограмма порошка CeO_2 .

В отличие от Gd_2O_3 и Y_2O_3 порошок CeO_2 представлял собой пластинчатые частицы, состоящие из поликристаллических наноразмерных зерен (рис. 8). Размеры пластин изменялись в широких

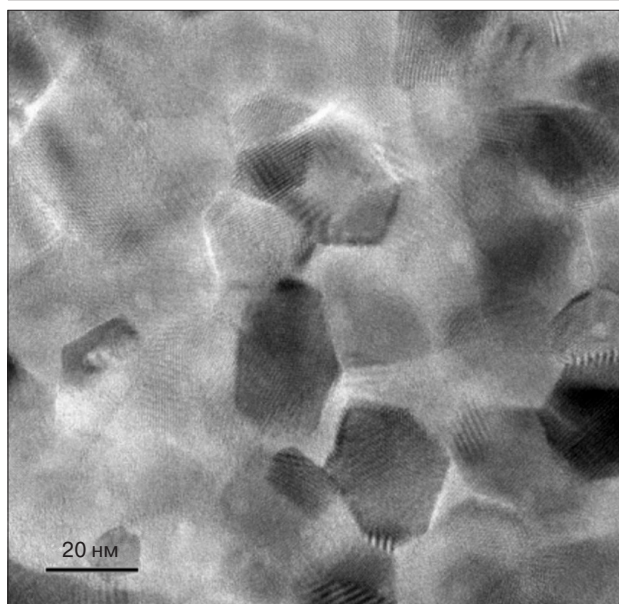
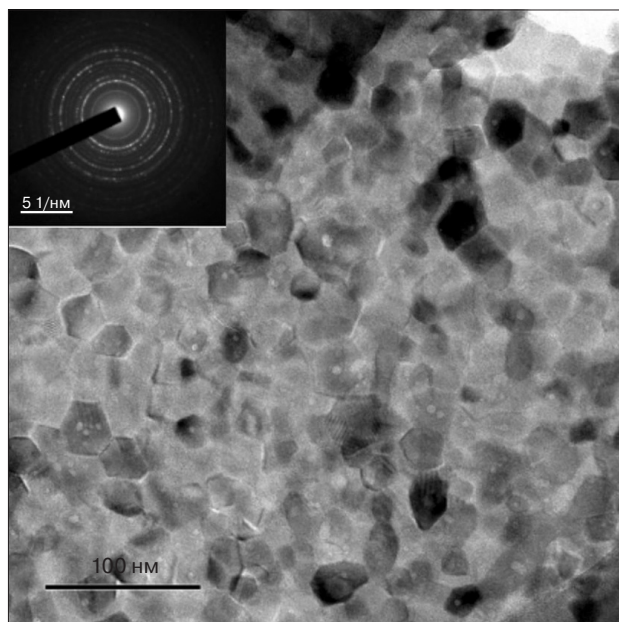


Рис. 5. ПЭМ-изображение частиц порошка Y_2O_3
Fig. 5. TEM image of Y_2O_3 powder particles

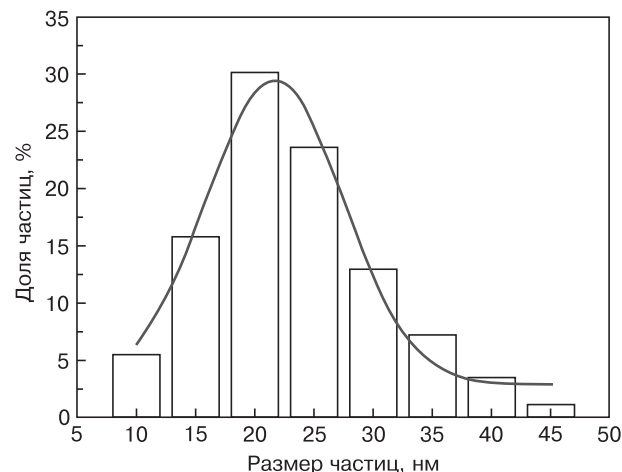


Рис. 6. Распределение частиц порошка Y_2O_3 по размерам
Fig. 6. Particle size distribution of Y_2O_3 powder

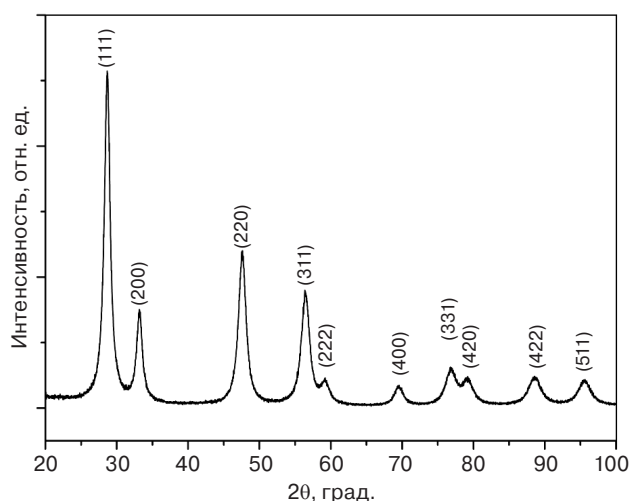


Рис. 7. Дифрактограмма порошка CeO_2
Fig. 7. Diffraction pattern of CeO_2 powder

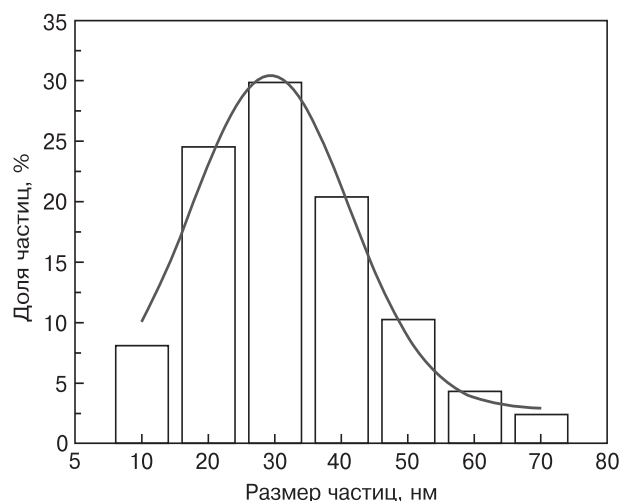


Рис. 9. Распределение частиц порошка CeO_2 по размерам
Fig. 9. Particle size distribution of CeO_2 powder

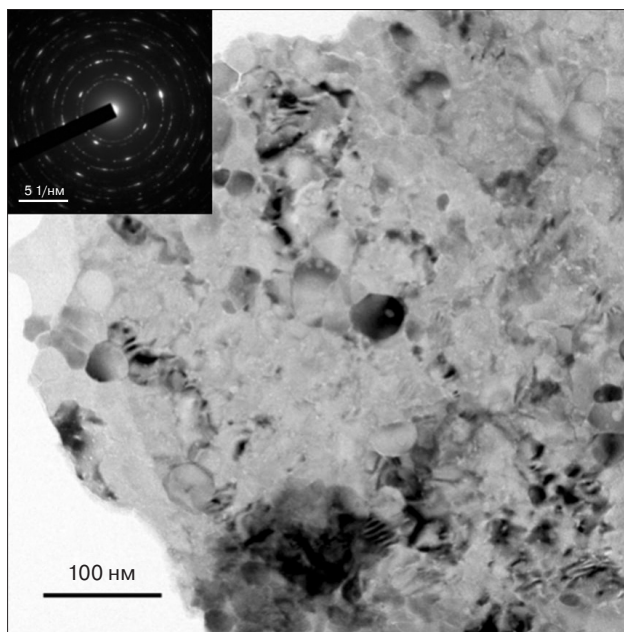
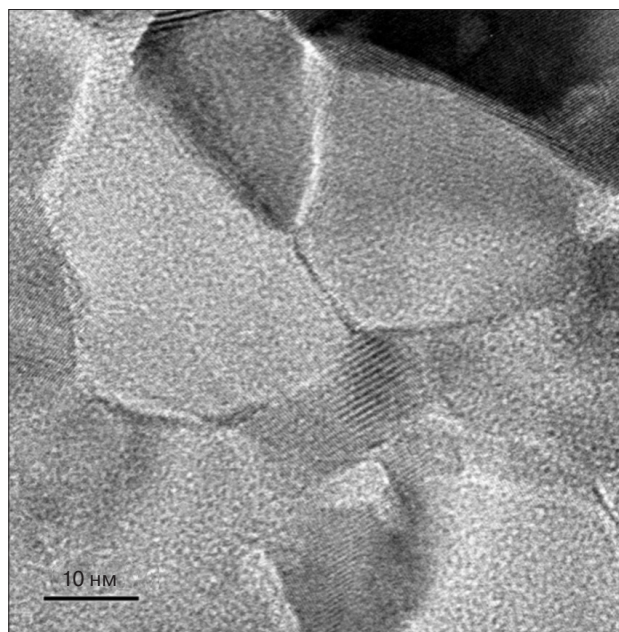


Рис. 8. ПЭМ-изображение частиц порошка оксида церия CeO_2
Fig. 8. TEM image of cerium oxide CeO_2 powder particles



пределах — от сотен нм до единиц микрон. Для порошка CeO_2 характерна разноразмерность, что хорошо видно по изображениям ПЭМ и электронограмме. Размеры зерен в пластинах варьируются от 10 до 70 нм с максимум распределения зерен по размеру 30 нм (рис. 9).

Заключение

Для снижения времени осаждения и, как следствие, получения более мелких частиц и стабильной воспроизводимости результатов, в данной работе было предложено изменить способ подачи осадителя — подавать его в реактор посредством распыления. Установлено, что скорость подачи осадителя на одну порцию должна соответствовать времени осаждения около 7–10 мин. Данный

прием позволил обеспечить равномерную подачу осадителя по всей поверхности (и по всему объему раствора).

Разработан метод синтеза нанодисперсных порошков оксидов РЗМ, который обеспечивает стабильную воспроизводимости результатов и однородный гранулометрический состав, заключающийся в термическом разложении карбонатов РЗМ, осажденных с определенной скоростью, и оригинальной подачей осадителя. Средний размер частиц полученных оксидов церия, гадолиния и иттрия составляет 15–30 нм.

Библиографический список / References

1. Бардаханов С.П., Лысенко В.И., Малов А.Н., Маслов Н.А., Номоев А.В. Структура и свойства керамики на основе нанодисперсных порошков оксида гадолиния

и оксида иттрия. *Физическая мезомеханика*. 2008; 11(5): 111—114.

Bardakhanov S.P., Lysenko V.I., Malov A.N., Maslov N.A., Nomoiev A.V. Structure and properties of ceramics of gadolinium oxide and yttrium oxide nanopowders. *Physical Mesomechanics*. 2008; 11(5): 111—114. (In Russ.)

2. Титов А.А., Клименко М.А., Горячева Е.Г., Ополченева Н.Л., Степарева Н.Н., Соколова Н.П. Получение нанокристаллических порошков оксидов церия и иттрия при термическом разложении оксалатов, карбонатов и гидроксидов. *Неорганические материалы*. 2008; 44(10): 1229—1232.

Titov A.A., Klimenko M.A., Goryacheva E.G., Opolchenova N.L., Stepareva N.N., Sokolova N.P. Preparation of ceria and yttria nanopowders via thermal decomposition of oxalates, carbonates, and hydroxides. *Inorganic Materials*. 2008; 44(10): 1101—1104.

3. Patel D. Rare-earth-doped nanoparticles prove illuminating. SPIE Newsroom. The international society for optics and photonics. 2008. 3 p. <https://doi.org/10.1117/2.1200810.1292>

4. Шмытько И.М., Кудренко Е.А., Струкова Г.К., Классен Н.В. «Изоморфные» фазы в нанодисперсных порошках оксидов редкоземельных металлов. *Физика твердого тела*. 2008; 50(6): 1108—1115.

Shmyt'ko I.M., Kudrenko E.A., Strukova G.K., Klassen N.V. "Isomorphous" phases in nanodispersed powders of rare-earth oxides. *Physics of the Solid State*. 2008; 50(6): 1157—1164.

5. Пат. № 2001124684/12 (РФ), МПК C01F17/00. Горячева Е.Г., Вдовина Л.В., Карманников В.П. Способ получения мелкодисперсного порошка оксида иттрия. Заявл. 06.09.2001; опублик. 10.12.2002.

Pat. No 2001124684/12 (RU), IPC C01F17/00. Goryacheva E.G., Vdovina L.V., Karmannikov V.P. Method of finely divided yttrium oxide powder preparing. Appl.: 06.09.2001; publ.: 10.12.2002.

6. Щербakov А.Б., Иванов В.К., Жолобак Н.М., Иванова О.С., Крысанов Е.Ю., Баранчиков А.Е., Спивак Н.Я., Третьяков Ю.Д. Нанокристаллический диоксид церия — перспективный материал для биомедицинского применения. *Биофизика*. 2011; 56(6): 995—1015.

Shcherbakov A.B., Ivanov V.K., Zholobak N.M., Ivanova O.S., Krysanov E.Yu., Baranchikov A.E., Spivak N.Ya., Tret'yakov Yu.D. Nanocrystalline cerium dioxide is a promising material for biomedical applications. *Biophysics*. 2011; 56(6): 995—1015. (In Russ.)

7. Щербakov А.Б., Ермаков В.А., Жолобак Н.М., Иванов В.К. Методы получения биоматериалов на основе нанодисперсного диоксида церия. *Биржа интеллектуальной собственности*. 2014; 13(4): 31—37.

Scherbakov A., Ermakov V., Zholobak N., Ivanov V. Methods of receiving biomaterials on the basis of nanodisperse dioxide of cerium. *Birzha intelektual'noi sobstvennosti*. 2014; 13(4): 31—37. (In Russ.)

8. Silina E.V., Ivanova O.S., Manturova N.E., Ivanova (Polezhaeva) O.S., Popov A., Mysina E.A., Artyushkova E.B., Kryukov A., Dodonova S.A., Kruglova M.P., Tinkov A.A., Skalny A.V., Ivanov V.K. Influence of the synthesis scheme of nanocrystalline cerium oxide and its concentration on the biological activity of cells providing wound regeneration. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023; 24(19): 14501. <https://doi.org/10.3390/ijms241914501>

9. Silina E.V., Ivanova O.S., Manturova N.E., Medvedeva O.A., Shevchenko A.V., Vorsina E.S., Achar R.R.,

Parfenov V.A., Stupin V.A. Antimicrobial activity of citrate-coated cerium oxide nanoparticles. *Nanomaterials*. 2024; 14(4): 354. <https://doi.org/10.3390/nano14040354>

10. Sakai N., Zhu L., Kurokawa A., Takeuchi H., Yano S., Yanoh T., Wada N., Taira Sh., Hosokai Y., Usui A., Machida Y., Saito H., Ichihyanagi Y. Synthesis of Gd₂O₃ nanoparticles for MRI contrast agents. *Journal of Physics: Conference Series*. 2012; 352(1): 2008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/352/1/012008>

11. Westmeyer G.G., Jasanoff A. Genetically controlled MRI contrast mechanisms and their prospects in systems neuroscience research. *Magnetic Resonance Imaging*. 2007; 25(6): 1004—1010. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2006.11.027>

12. Ichihyanagi Y., Moritake S., Taira S., Setou M. Functional magnetic nanoparticles for medical application. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007; 310(2): 2877—2879. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.11.083>

13. Moritake S., Taira S., Ichihyanagi Y., Morone N.; Song S.-Y., Hatanaka T., Shigeki Y., Setou M. Functionalized nano-magnetic particles for an in vivo delivery system. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2007; 7(3): 937—944. <https://doi.org/10.1166/jnn.2007.216>

14. Shigeoka D., Katayanagi H., Moro Y., Kimura S., Mashino T., Hiroki T., Ichihyanagi Y. AC magnetic susceptibility of Co-Ti-Zn ferrite nanoparticles for hyperthermia agents. In: *3rd Inter. nanoelectronics conf.* Hong-Kong, China; 2010. P. 904. <https://doi.org/10.1109/inec.2010.5425140>

15. Klasson A., Ahren M., Hellqvist E., Söderlind F., Rosén A., Käll P.-O., Uvdal K., Engström M. Positive MRI contrast enhancement in THP-1 cells with Gd₂O₃ nanoparticles. *Contrast Media & Molecular Imaging*. 2008; 3(3): 106—111. <https://doi.org/10.1002/cmmi.236>

16. Porosnicu I., Butnaru C.M., Tiseanu I., Stancu E., Munteanu Cr.V.A., Bogdan B., Duliu O.G., Nicolae F. SimaY₂O₃ nanoparticles and X-ray radiation-induced effects in melanoma cells. *Molecules*. 2021; 26: 3403—3419. <https://doi.org/10.3390/molecules26113403>

17. Setua S., Menon D., Asok A., Nair S., Koyakutty M. Folate receptor targeted, rare-earth oxide nanocrystals for bi-modal fluorescence and magnetic imaging of cancer cells. *Biomaterials*. 2010; 31(4): 714—729. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.09.090>

18. Cavouras D., Kandarakis I., Panayiotakis G., Evangelou E.K., Nomicos C.D. An evaluation of the Y₂O₃:Eu³⁺ scintillator for application in medical x-ray detectors and image receptors. *Medical Physics*. 1996; 23(12): 1965—1975. <https://doi.org/10.1118/1.597769>

19. Skandani A., Pham T., Luhrs C., El-Genk M.S., Al-Haik M. Effects of composition and transparency on photo and radioluminescence of Y₂O₃:Eu complexes. *Radiation Effects and Defects in Solids*. 2011; 166(7): 501—512. <https://doi.org/10.1080/10420150.2011.569720>

20. Shivaramu N., Lakshminarasappa B., Nagabhushana. K.R., Singh F., Swart H.C. Synthesis, thermoluminescence and defect centres in Eu³⁺ doped Y₂O₃ nanophosphor for gamma dosimetry applications. *Materials Research Express*. 2017; 4(11): 115033. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa99ec>

21. Santos S., Rodrigues O., Campos L. Bio-prototyping of europium-yttria based rods for radiation dosimetry. *Materials Chemistry and Physics*. 2017; 199(2017): 557—566. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.07.063>

22. Traina C.A., Schwartz J. Surface modification of Y₂O₃ nanoparticles. *Langmuir*. 2007; 23(18): 9158—9161. <https://doi.org/10.1021/la701653v>

23. Гасанов А.А., Юрасова О.В., Арзманова А.Б., Данилова Е.А. Разработка методов синтеза наноразмерных порошков оксидом европия и гадолиния. В: *Сб. тр. XIII Российско-Китайского симпозиума «Новые материалы и технологии»*. Казань, Россия, 21–25 сентября 2015 г. М.: ООО «Интерконтакт Наука»; 2015. Т. 2. С. 770–772.

Gasanov A.A., Yurasova O.V., Arzmanova A.B., Danilova E.A. Development of methods for the synthesis of nanosized powders with europium and gadolinium oxide. In: *Proceed. of the XIII Russian-Chinese Symposium "New Materials and Technologies"*. Kazan, Russia, September 21–25, 2015. Moscow: Interkontakt nauka; 2015. Vol. 2. P. 770–772. (In Russ.)

24. Пат. № 2414330 (РФ), МПК B22F9/16, C01F17/00, B82B3/00. Соколова Н.П., Титов А.А., Лапшина И.Е.,

Вилинский А.М., Ополченева Н.Л., Еременко З.В. Способ получения наноразмерных порошков индивидуальных оксидов лантаноидов. Заявл.: 03.12.2008; опубл.: 20.03.2011.

Pat. No 2414330 (RU), IPC B22F9/16, C01F17/00, B82B3/00. Sokolova N.P., Titov A.A., Lapshina I.E., Vilyanskii A.M., Opolchenova N.L., Eremenko Z.V. Method of producing nano-sized powders of some lanthanide oxides. Appl.: 03.12.2008; publ.: 20.03.2011.

25. Серебрянников В.В. Химия редкоземельных элементов. Под ред. Л.А. Алексеенко. В 2-х т. Томск: Издательство томского университета; 1959. Т. 1. С. 444–446. 531 с.

Alekseenko L.A. (ed.). Serebryannikov V.V. Chemistry of rare earth elements. In 2 vol. Tomsk: Izdatel'stvo tom'skogo universiteta; 1959. Vol. 1. 531 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Островская Анна Андреевна — инженер-технолог, магистр, ООО «ЛАНХИТ, ш. Энтузиастов, д. 34, Москва, 105118, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7492-5266>; e-mail: ostrovskaya.a.a@yandex.ru

Anna A. Ostrovskaya — Process Engineer, Master, LANHIT LLC, 34 Entuziastov Highway, Moscow 105118, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7492-5266>; e-mail: ostrovskaya.a.a@yandex.ru

Андреева Ольга Ивановна — канд. хим. наук, заведующая лабораторией диагностики высокочистых неорганических материалов, ООО «ЛАНХИТ, ш. Энтузиастов, д. 34, Москва, 105118, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4097-7599>; e-mail: a.olga@lanhit.ru

Olga I. Andreeva — Cand. Sci. (Chem.), Head of Laboratory for Diagnostics of High-Purity Inorganic Materials, LANHIT LLC, 34 Entuziastov Highway, Moscow 105118, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4097-7599>; e-mail: a.olga@lanhit.ru

Аксенова Ксения Алексеевна — инженер-технолог, магистр, ООО «ЛАНХИТ, ш. Энтузиастов, д. 34, Москва, 105118, Российская Федерация; e-mail: aksenia71.98@mail.ru

Ksenia A. Aksyonova — Process Engineer, Master, LANHIT LLC, 34 Entuziastov Highway, Moscow 105118, Russian Federation; e-mail: aksenia71.98@mail.ru

Чувиллина Елена Львовна — канд. техн. наук, директор, ООО «ЛАНХИТ, ш. Энтузиастов, д. 34, Москва, 105118, Российская Федерация; e-mail: chuvilina.elena@lanhit.ru

Elena L. Chuvilina — Cand. Sci. (Eng.), Director, LANHIT LLC, 34 Entuziastov Highway, Moscow 105118, Russian Federation; e-mail: chuvilina.elena@lanhit.ru

Гасанов Ахмедали Амиралы оглы — канд. хим. наук, главный технолог, ООО «ЛАНХИТ, ш. Энтузиастов, д. 34, Москва, 105118, Российская Федерация; e-mail: akhmedali@lanhit.ru

Akhmedali Amirali Gasanov — Cand. Sci. (Chem.), Chief Technologist, LANHIT LLC, 34 Entuziastov Highway, Moscow 105118, Russian Federation; e-mail: akhmedali@lanhit.ru

Силина Екатерина Владимировна — доктор мед. наук, профессор, Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2, Москва, 119048, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0246-5149>; e-mail: silinaekaterina@mail.ru

Ekaterina V. Silina — Doctor of Medicine, Professor, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, 8–2 Trubetskaya Str., Moscow 119048, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0246-5149>; e-mail: silinaekaterina@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.2024; поступила после доработки 12.07.2024; принята к публикации 04.09.2024

Received 15 May 2024; Revised 12 July 2024; Accepted 4 September 2024